BALANCE HIDRO-CLIMÁTICO DE *Brosimum alicastrum* Sw. Y SU VARIABILIDAD ANTE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN, MÉXICO

HYDRO-CLIMATIC BALANCE OF *Brosimum alicastrum* SW. AND ITS VARIABILITY UNDER CLIMATE CHANGE SCENARIOS IN THE YUCATAN PENINSULA, MEXICO

Alberto Santillán-Fernández[1]*, Abimael Calva-Castillo[2], Nehemías Vásquez-Bautista[3], Zulema G. Huicab-Pech[4], Alfonso Larqué-Saavedra[5] y Jaime Bautista-Ortega[4]

[1]Colegio de Postgraduados (CP) Campus Campeche, Catedrático CONACYT, Champotón, Campeche, México. [2]Instituto Tecnológico Superior de Venustiano Carranza, Ingeniería Forestal, Venustiano Carranza, Puebla, México. [3]Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, Cancún, Quintana Roo, México. [4]CP, Campus Campeche, Departamento de Ciencias Agrícolas, Champotón, Campeche, México. [5]Centro de Investigación Científica de Yucatán, Unidad de Recursos Naturales, Mérida, Yucatán, México.

**Autor de correspondencia* (asantillanf@conacyt.mx)

RESUMEN

Históricamente el ramón (*Brosimum alicastrum* Sw.) se ha utilizado por la cultura Maya como forraje y como fuente de proteína para consumo humano. Por la amplia distribución natural del ramón en la Península de Yucatán, y su resistencia a periodos de estiaje, su manejo silvícola ha sido nulo; sin embargo, las áreas donde se desarrolla, son altamente vulnerables a las variaciones del clima. Por lo anterior, el objetivo del presente estudio fue asociar el balance hídrico climático (BHC) de las áreas donde crece ramón en la Península de Yucatán, con la distribución potencial actual (DPA) de la especie y los efectos que el clima futuro provocaría sobre esta distribución, para establecer los factores climáticos que condicionan el desarrollo de la especie y eventualmente su manejo silvícola. Mediante técnicas de información geográfica se determinaron las variables climáticas que condicionan la DPA de ramón en la región; para ello, se empleó el algoritmo MaxEnt. Se ubicaron espacialmente las áreas más vulnerables al clima futuro con modelos de cambio climático tipo A_2. El BHC mostró que la disponibilidad de agua para ramón en la región, para el periodo 1979-2012 presentó una tendencia decreciente (β_1 = -0.0212). MaxEnt encontró que las variables climáticas que condicionan la DPA del ramón están asociadas con la disponibilidad de agua, al ser evaporación anual (el 85% de la precipitación en la región se evapora) y la precipitación en el trimestre más húmedo (150 mm por mes, julio a septiembre) las que más aportaron al modelo con 48.3 y 10.3 % respectivamente. Los modelos de cambio climático pronostican una reducción en la cobertura de la especie del 80 % del área actual, alejándola de las costas y concentrándola en el centro de la Península de Yucatán. Se concluye que el manejo silvícola para la especie será necesario en el corto plazo.

Palabras clave: *Brosimum alicastrum* Sw., árbol ramón, estrés hídrico, exceso hídrico, índice de humedad, silvícola.

SUMMARY

Historically, ramon (*Brosimum alicastrum* Sw.) has been used by the Mayan culture as forage and as a source of protein for human consumption. Due to the wide natural distribution of ramon in the Yucatan Peninsula, and its resistance to periods of low water, its silvicultural management has been null; however, the areas where it develops are highly vulnerable to climate variations. Therefore, the aim of the present study was to associate the climatic water balance (CWB) of the areas where ramon grows in the Yucatan Peninsula, with the current potential distribution (CPD) of the species and the effects that the future climate would cause on distribution to establish the climatic factors that condition the development of the species and eventually its silvicultural management. Using geographic information techniques, the climatic variables that determine the CPD of ramon in the region were determined; for this, the MaxEnt algorithm was used. The most vulnerable areas to future climate were spatially located with A2-type climate change models. The CWB showed that the availability of water for ramon in the region, for the period 1979-2012 presented a decreasing trend (β_1 = -0.0212). MaxEnt found that the climatic variables that condition the ramon CPD are associated with the availability of water, being annual evaporation (85% of the precipitation in the region evaporates) and precipitation in the wettest quarter (150 mm per month, July to September) the ones that contribute the most to the model with 48.3 and 10.3 % respectively. Climate change models predict a reduction in the coverage of the species of 80 % of the current area, moving it away from the coasts and concentrating it in the center of the Yucatan Peninsula. It is concluded that silvicultural management for the species will be necessary in the short term.

Index words: *Brosimum alicastrum* Sw., ramon tree, humidity index, ramon tree, silvicultural, water excess, water stress.

INTRODUCCIÓN

El ramón (*Brosimum alicastrum* Swartz) es un árbol originario de Mesoamérica y el Caribe, con amplia distribución en el sureste de México, crece de manera silvestre en selvas perennifolias y subcaducifolias (Vega *et al.*, 2003). Por sus características nutritivas en la alimentación animal y humana, el árbol ramón tiene alto potencial para la agroindustria de alimentos pecuarios, sobre todo en los sectores porcino, bovino, ovino, avícola y acuícola, donde se suelen usar todas sus partes como hojas, tallo, semillas, fruto y látex (Ramírez-Sánchez *et al.*, 2017).

Sobre el árbol ramón se ha investigado respecto a sus propiedades en la alimentación animal y humana, botánica y ecología de la especie, y recientemente, por su alto potencial económico, se han analizado temas de manejo forestal (Hernández-González *et al.*, 2015); sin embargo,

Recibido: 7 de Octubre de 2019
Aceptado: 8 de Octubre de 2020

a pesar de toda la investigación que se ha desarrollado sobre la especie, existe poco conocimiento sobre los efectos que el cambio climático tendría en la distribución de la misma, y de cómo éste impactará en el manejo de las plantaciones comerciales, debido a que en la actualidad la especie se distribuye mayormente de manera natural, con prácticamente nulo manejo silvícola (Vergara-Yoisura *et al*., 2014).

Van Ittersum y Rabbinge (1997) postularon que para que una especie natural pueda desarrollarse adecuadamente como cultivo se deben considerar los factores determinantes relacionados con el clima, y las limitantes donde se considera el manejo silvícola. El rendimiento de un cultivo está condicionado por cuatro factores: luz, calor, agua y nutrientes; de acuerdo con Van Ittersum *et al.* (2003), el agua y los nutrientes son los elementos limitantes donde más se puede incidir para mejorar el rendimiento de un cultivo a través de un manejo silvícola. Calder (2007) ha considerado que el riego en especies arbóreas mejora sustancialmente sus rendimientos, incluso sin fertilizar.

Para determinar los requerimientos de riego de un cultivo, la metodología del balance hídrico climático (BHC) resulta una buena herramienta, ya que mide la cantidad de agua proveniente de la lluvia que la vegetación dispone en un ecosistema dado (Ruíz-Álvarez *et al.*, 2012); además, el BHC permite conocer el potencial de evapotranspiración, exceso y déficit hídrico a lo largo de una temporada para una región determinada (Sentelhas *et al.,* 2008). De acuerdo con Malamos *et al.* (2015), dentro de los métodos para determinar el BHC, el de cálculo más simple es el propuesto por Thornthwaite y Mather (1957), al requerir solo datos de temperatura, precipitación y capacidad de almacenamiento de agua del suelo.

Los modelos de distribución potencial y de cambio climático para una especie, obtenidos mediante técnicas de información geográfica, también permiten mejorar el manejo de un cultivo al determinar las variables climáticas que más inciden en su desarrollo (Phillips *et al.,* 2006). Dentro de los modelos de distribución de especies, el algoritmo de Máxima Entropía (MaxEnt) tiene las mejores evaluaciones en comparación con otros programas que modelan la probabilidad de distribución natural de una especie a partir de variables climáticas (Elith *et al*., 2011), este modelo ha sido aplicado con éxito en especies arbóreas como *Pinus caribaea* (Miranda *et al.,* 2017).

Los modelos de cambio climático permiten evaluar el impacto potencial que las variaciones del clima futuro tendrán sobre la distribución natural de una especie, lo que de acuerdo con Van Zonneveld *et al.* (2009), ayuda a la toma de decisiones para mejorar el manejo del cultivo y garantizar el desarrollo de la especie en la región. Estos modelos han sido aplicados en el manejo silvícola de especies forestales como *Pinus patula* y *Pinus tecunumanii* (Leibing *et al.*, 2009).

Aunque por naturaleza *Brosimum alicastrum* Sw. es resistente a periodos de estrés hídrico, sus rendimientos mejoran sustancialmente cuando se le aplican riegos en épocas de estiaje (Hernández-González *et al.*, 2015); sin embargo, el nulo manejo silvícola de la especie en combinación con las variaciones del clima en la Península de Yucatán ha provocado que la abundancia de la especie se esté reduciendo (Vergara-Yoisura *et al*., 2014).

Bajo este contexto, el objetivo del presente estudio fue asociar el balance hídrico climático de las áreas donde crece ramón en la Península de Yucatán, con la distribución potencial actual de la especie y los efectos que el clima futuro provocaría sobre esta distribución, mediante herramientas de sistemas de información geográfica, para establecer los factores climáticos que condicionan el desarrollo de la especie y eventualmente su manejo silvícola.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

En este estudio se consideró la distribución puntual georreferenciada de *Brosimum alicastrum* Sw. en México, con especial énfasis en la península de Yucatán, que comprende los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán en el sureste de México, de acuerdo con lo reportado en el muestreo del Inventario Nacional Forestal y de Suelos (CONAFOR, 2014). La península de Yucatán se caracteriza por contener en su mayoría selva media subperenifolia y selva alta perenifolia, con suelos arcillosos, precipitaciones de 600 a 4000 mm, con épocas de estiaje de tres a siete meses, temperatura media anual de 18 a 27 ºC y altitudes de 20 a 1000 msnm (INEGI, 2016). Estas condiciones hacen de la península de Yucatán una región idónea para el desarrollo de la especie *Brosimum alicastrum* Sw. (Vergara-Yoisura *et al*., 2014).

Análisis de abundancia

Los datos georreferenciados de distribución puntual de *Brosimum alicastrum* Sw. sirvieron de base para ubicar las regiones con el mayor número de ejemplares en el contexto nacional, para ello se aplicó un análisis de abundancia en el software de sistemas de información geográfica DivaGis v7.5 (Hijmans *et al*., 2012). Se consideró un tamaño de pixel de 10 min (0.16 grados sexagesimales), que equivale a un área de pixel de 18 km^2 (Hijmans *et al*., 2005). En cada pixel se contabilizaron los puntos georreferenciados con la

distribución puntual de la especie y se sumó el número de árboles reportado por punto georreferenciado.

Balance hídrico climático e índice de humedad

De la base de datos Climatológica Nacional (CLICOM, 2018) se obtuvieron los promedios mensuales de temperatura (ºC), precipitación (mm) y evaporación (mm) para la serie 1979-2012. En total se analizaron 91 estaciones meteorológicas: 31 de Campeche, 20 de Quintana Roo y 40 de Yucatán. Con esta información se determinó el balance hídrico climático (BHC) por mes, e índice de humedad por año (IH), se aplicaron las siguientes metodologías:

Balance hídrico climático

Se empleó el propuesto por Thornthwaite y Mather (1957) con una capacidad de almacenamiento de agua del suelo (CAS) de 200 mm (Santillán *et al.,* 2013); para ello, se recurrió a la metodología de Rolim *et al.* (1998), lo que permitió estimar el potencial de evapotranspiración (PET), el exceso hídrico (EH) y el déficit hídrico (DH) mensuales.

Índice de humedad

Con el PET (mm año^{-1}), EH (mm año^{-1}) y DH (mm año^{-1}) se calculó el índice de humedad por año (IH) expresado en % (Ruíz-Álvarez *et al.,* 2012). La ecuación empleada fue:

$$IH = \frac{100\ (EH - DH\ )}{PET}$$

La tendencia del *IH* se estimó con modelos temporales paramétricos (regresión lineal) por el método de mínimos cuadrados (Gujarati, 2007), mediante la ecuación: $Y = b_0 + b_1X$, donde *Y* es la recta de ajuste, *X* toma el valor del año correspondiente (1979-2012), b_0 y b_1 son estimadores, b_1 (pendiente) indica la tendencia en el tiempo (*X*).

Zonas potenciales de distribución natural actual

La distribución puntual de *Brosimum alicastrum* Sw. en las áreas con el mayor número de ejemplares, obtenida en el análisis de abundancia, se relacionó con variables climáticas de dichas regiones con una resolución de 30 s (1 km^2). Para este análisis se consideraron las 19 variables bioclimáticas más evaporación anual, disponibles en la base de datos global de superficies climáticas disponible en http://www.worldclim.com/version2 (Fick y Hijmans, 2017).

Los puntos georreferenciados con presencia de *Brosimum alicastrum* Sw. se introdujeron en el algoritmo de Máxima entropía (MaxEnt, versión 3.4.1) (Philips *et al.,* 2018) en formato delimitado por comas (.csv) y las variables climáticas en formato ASCII (.asc). Se aplicó la metodología de Hijmans *et al.* (2005) y se determinó la probabilidad de que la especie se desarrolle adecuadamente considerando variables climáticas; este análisis permitió, además, identificar el factor más condicionante de su desarrollo. Los resultados se importaron a DivaGis v7.5 (Hijmans *et al.*, 2012) y se convirtieron a formato grid (.grd) para visualizarse como imágenes.

Efectos del cambio climático en la distribución natural de *Brosimum alicastrum* Swartz

Finalmente, para determinar las áreas más vulnerables a las variaciones futuras del clima de las regiones con mayor abundancia de *Brosimum alicastrum* Sw. se aplicó un modelo de cambio climático a la distribución puntual de la especie, conforme a la metodología de Hijmans *et al.* (2005). Para ello, se combinaron los resultados obtenidos mediante el algoritmo de MaxEnt (Zonas potenciales de distribución natural actual) con proyecciones climáticas a 2050 de modelos de circulación global (promedio CCCMA, HADCM3 y CSIRO) bajo el escenario de emisión A2, con 19 variables bioclimáticas (IPCC, 2007).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de abundancia

CONAFOR (2014) reportó 9,882 sitios de muestreo donde se encontraron 287,203 árboles de *Brosimum alicastrum* Sw., distribuidos en 18 estados de los 32 que conforman la república mexicana. La mayor cobertura se localizó en la Península de Yucatán con el 87.22 %, integrada por los estados de Quintana Roo (53.61 %), Campeche (24.31 %) y Yucatán (9.30 %) (Cuadro 1). De acuerdo con INEGI (2016), el mayor número de registros de la especie en Quintana Roo podría deberse a que es la entidad con la mayor cobertura de selva en México, la cual predomina en el 90 % de la superficie de dicho estado.

Cuadro 1. Cobertura estatal de sitios de muestreo y número de árboles de *Brosimum alicastrum* Sw. en México conforme al Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2014.

Estado	Sitios de muestreo		Árboles	
	Número	%	Número	%
Quintana Roo	4570	46.25	153,981	53.61
Campeche	2640	26.72	69,813	24.31
Yucatán	737	7.46	26,699	9.30
Otros (15)	1935	19.58	36,710	12.78
Total	9882	100	287,203	100

Al aplicar la técnica de análisis de abundancia a los datos georreferenciados con distribución puntual de *Brosimum alicastrum* Sw. (CONAFOR, 2014) se ubicaron espacialmente las regiones en México con mayor número de individuos de la especie. Los resultados indican que la Península de Yucatán (PY) es el área nacional donde el árbol ramón se encuentra con mayor frecuencia (Figura 1). Las regiones de la PY donde crece el ramón se caracterizan por tener precipitaciones de 450 a 1500 mm, temperatura media anual de 26 ºC y altitud de 0 a 400 msnm (Vega *et al.*, 2003), condiciones óptimas para el desarrollo de la especie de acuerdo con lo reportado por Meiners *et al.* (2009).

Balance hídrico climático e índice de humedad

La aplicación de la metodología del balance hídrico climático propuesto por Thornthwaite y Mather (1957) permitió crear diagramas bioclimáticos e índices de humedad para las áreas con mayor presencia de *Brosimum alicastrum* Sw. en la Península de Yucatán en cada uno de los estados que la componen. Los resultados indican que en las regiones donde se desarrolla *Brosimum alicastrum* Sw. el déficit hídrico es frecuente, debido a que el potencial de evapotranspiración anual supera en la mayoría de los meses la cantidad de agua que se recolecta en forma de lluvia, el caso más extremo se presenta para las regiones del estado de Yucatán, seguido por Campeche y Quintana Roo (Figura 2).

La resistencia al estrés hídrico de *Brosimum alicastrum* Sw. ha sido documentada por Meiners *et al.* (2009); sin embargo, Hernández-González *et al.* (2015) encontraron, para la zona de Yucatán, que el crecimiento primario (altura) y secundario (diámetro) de plántulas de ramón aumenta considerablemente en época de lluvias y cuando hay suministro de riego en épocas de estiaje.

La tendencia del IH para la serie 1979-2012 permitió conocer la disponibilidad de agua que la especie tiene en las regiones donde se localiza. A pesar de que los indicadores estadísticos no son significativos ($R^2 < 0.05$) la tendencia de la regresión lineal es decreciente para las zonas de Campeche (-0.0723), Quintana Roo (-0.3883), y en general para la Península (-0.0212); sólo en el estado de Yucatán se observa una tendencia positiva (0.2149) (Figura 3); sin embargo, en todos los casos el IH presentó valores por debajo de cero, lo que de acuerdo con Ruíz-Álvarez *et al.* (2012), indica regiones con déficit hídrico. Estos

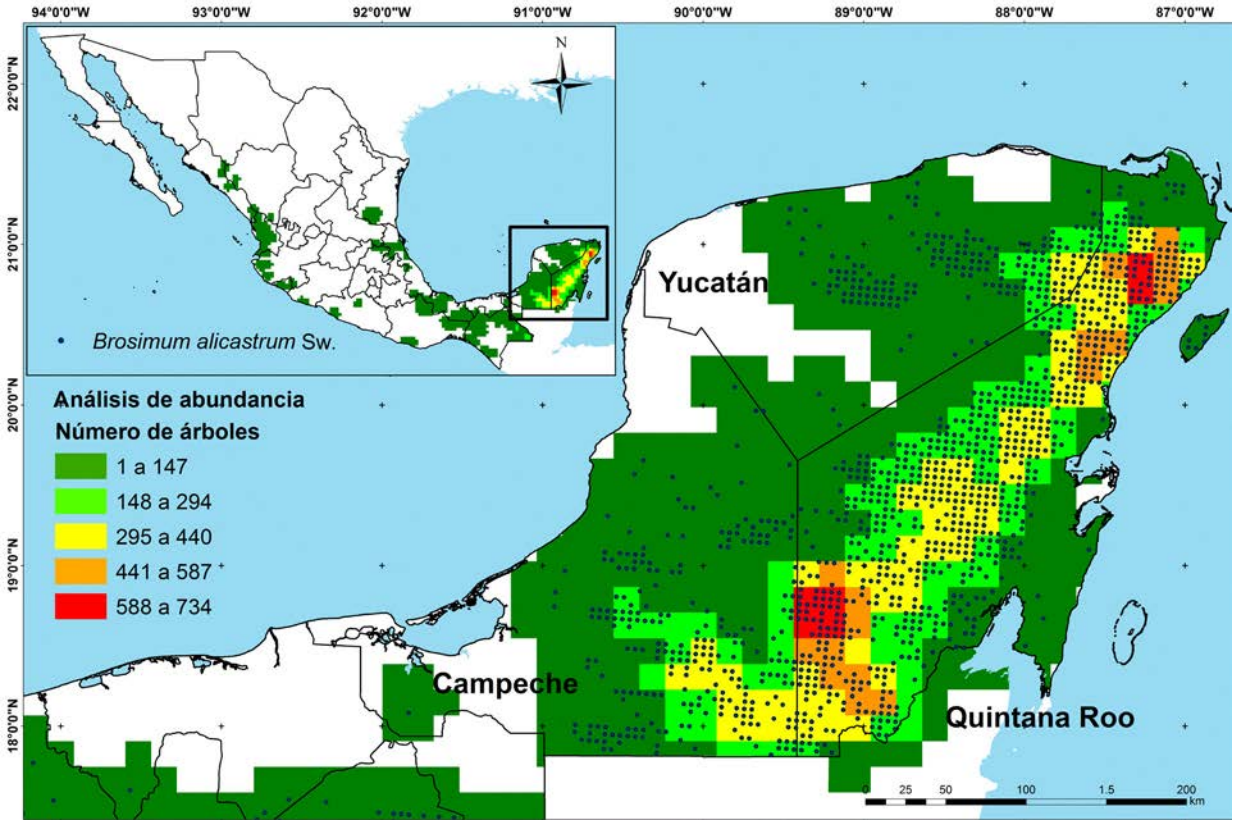


Figura 1. Distribución espacial de las regiones en México con mayor presencia de *Brosimum alicastrum* Sw., delimitadas mediante análisis de abundancia con herramientas de Sistemas de Información Geográfica y un tamaño de pixel de 18 km².

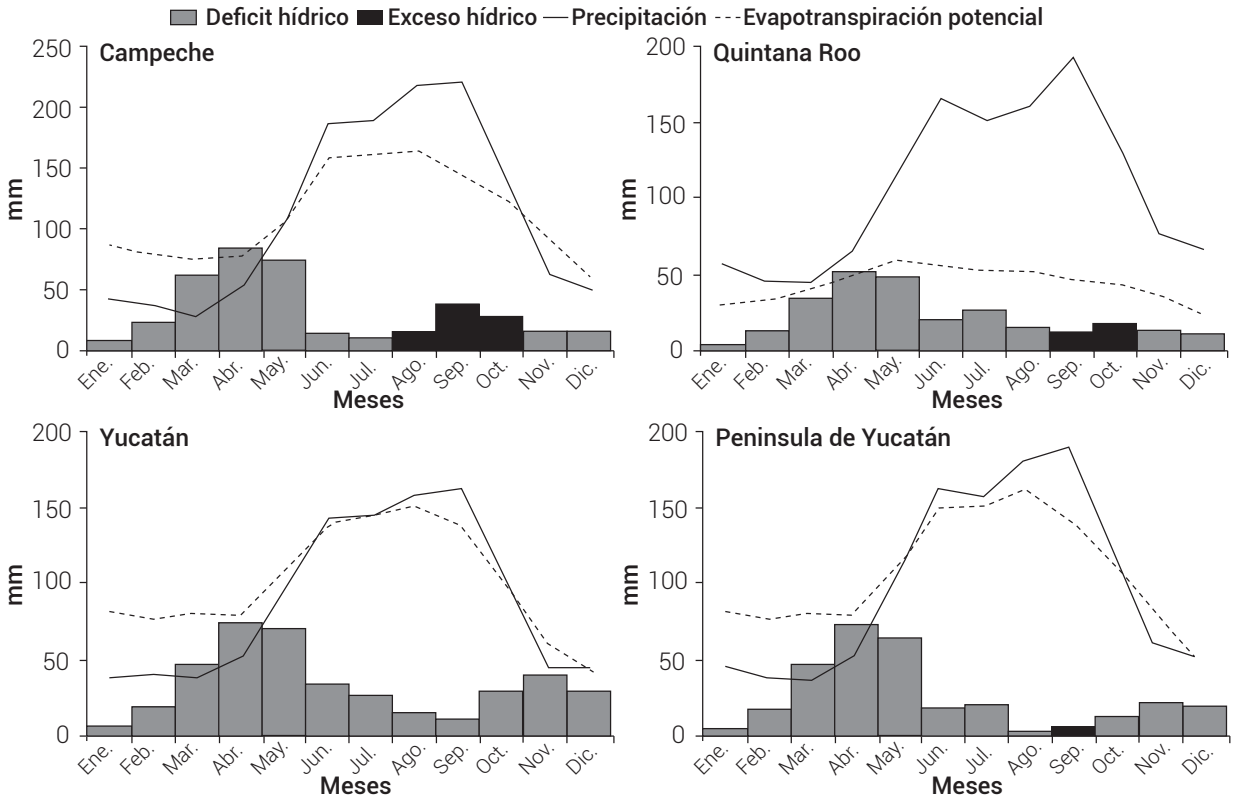


Figura 2. Diagramas bioclimáticos de los estados de la Península de Yucatán, a partir de las medias de precipitación, evapotranspiración potencial, déficit y exceso hídrico para el periodo 1979-2012.

resultados coinciden con los de Hernández-González *et al.* (2015), quienes estimaron que la disponibilidad de agua para *Brosimum alicastrum* Sw. en la Península de Yucatán se está reduciendo.

Zonas potenciales de distribución natural actual

Este análisis se basó en el registro puntual de 7,947 sitios de muestreo en la Península de Yucatán, donde se localizaron 250,493 individuos de *Brosimum alicastrum* Sw., esta población, de acuerdo con Baldwin (2009), se considera un tamaño de muestra suficiente para garantizar predicciones confiables de MaxEnt. No se consideró autocorrelación espacial ni ambiental, debido a que la distancia mínima entre los sitios de muestreo fue de 5 km (CONAFOR, 2012; Siabato y Manrique, 2019); además, de acuerdo con Elith *et al*. (2011), las predicciones de MaxEnt incrementan su confiabilidad a medida que se incluyen más puntos de presencia de la especie. De esta forma, los resultados obtenidos fueron altamente significativos con un nivel de confiabilidad del 95% ($P < 0.0001$) y un coeficiente de ajuste (AUC = Área bajo la curva) de 95.6 %.

En la Figura 4 se observa una estrecha relación entre las zonas con mayor abundancia y las zonas con mayor probabilidad de que *Brosimum alicastrum* Sw. se distribuya potencialmente bajo condiciones climáticas actuales. De las 20 variables utilizadas en el modelo probabilístico de MaxEnt, cinco contribuyeron con el 76.1 % de la predicción. Las de mayor importancia fueron evaporación anual (85 % de la precipitación en la región se evapora) con el 48.3 %, Bio16 (precipitación en el trimestre más húmedo, más de 150 mm por mes, de julio a septiembre) 10.3 %, Bio7 (variación anual de temperatura de 16 a 36 ºC) 6.9 %, Bio12 (precipitación anual, media de 1207 mm) 5.6 % y Bio6 (temperatura mínima en el mes más frio, diciembre con 16 ºC) 5.0 %.

Al relacionar el diagrama bioclimático con las zonas potenciales, se observa que las áreas con mayor idoneidad para la distribución del *Brosimum alicastrum* Sw. se presentan en el estado de Quintana Roo, donde la diferencia entre la precipitación y evapotranspiración potencial anual es mayor (Cuadro 2). Estos resultados sugieren que la disponibilidad de agua en la región condiciona el desarrollo de la especie. Al respecto, Hernández-González *et al.* (2015) señalaron que en el manejo silvícola de la especie, la aplicación de riegos en periodos de estiaje mejora sustancialmente la productividad de frutos, por lo que ante los descensos en el IH no se descarta el riego en un futuro.

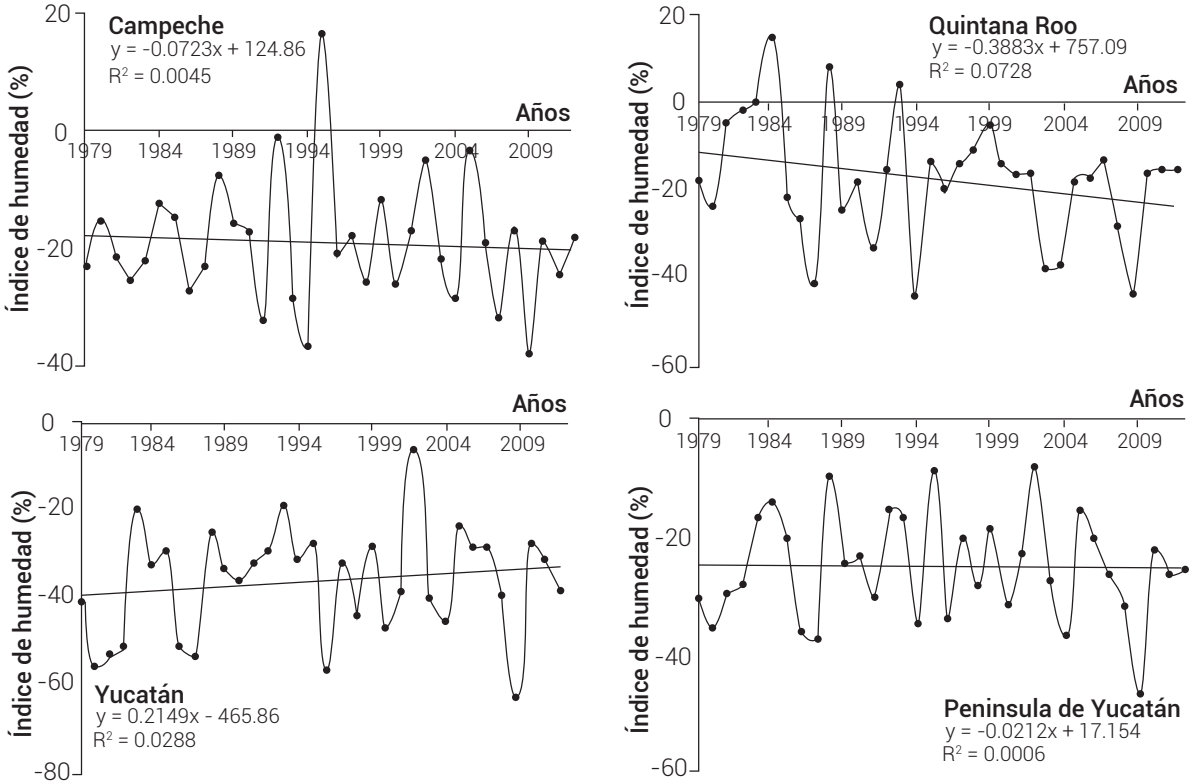


Figura 3. Tendencia del índice de humedad de 1979 a 2012 de las regiones donde se desarrolla *Brosimum alicastrum* Sw. en la Península de Yucatán, construida a partir del balance hídrico climático.

Efectos del cambio climático en la distribución natural de *Brosimum alicastrum* Sw.

El hábitat climático futuro para *Brosimum alicastrum* Sw., proyectado mediante el algoritmo de MaxEnt para la Península de Yucatán, resultó significativo con un coeficiente de ajuste (AUC) de 0.934, obtenido después de 500 iteraciones. El AUC es una medida directa de la capacidad de discriminación del modelo, que toma valores próximos a 1 cuando existe un buen ajuste con los datos de evaluación y cercanos a 0.5 cuando el ajuste no es mejor que el obtenido al azar (Fielding y Bell, 1997).

El análisis de los modelos de cambio climático generó tres escenarios: 1) Áreas de bajo impacto: áreas donde la especie se distribuye potencialmente en la actualidad y en el futuro, 2) Áreas de alto impacto: áreas donde la especie se distribuye potencialmente en la actualidad pero no es apta en el futuro, y 3) Área no apta, ni bajo las condiciones actuales ni futuras (Hijmans *et al.,* 2005) (Figura 5). De las 19 variables bioclimáticas empleadas, seis aportaron el 87.3 % de la predicción: Bio11 (temperatura promedio del trimestre más frío) 33.5 %, Bio1 (temperatura promedio anual) 20.3 %, Bio6 (temperatura mínima en el mes más frío) 11.7 %, Bio17 (precipitación en el trimestre más seco) 9.7 %, Bio13 (precipitación en el mes más húmedo) 6.4 % y Bio12 (precipitación anual) 5.7 %.

En la Figura 5 se presenta de manera espacial la proyección del hábitat climático para el año 2050 para *Brosimum alicastrum* Sw., conforme las zonas potenciales de distribución natural actual. Se observa una reducción drástica de más del 80% (áreas de alto impacto) que alejaría el desarrollo de la especie de las costas y la concentraría en el centro de la Península de Yucatán (áreas de bajo impacto). Estos resultados coinciden con lo reportado por Garza-López *et al.* (2016; 2018), quienes estimaron para especies forestales reducciones del 60 % en *Swietenia macrophylla* King y 43 % en *Lysiloma latisiliquum* en la misma región de estudio. Por su parte, Ovando-Hidalgo *et al.* (2020) pronosticaron un incremento en las temperaturas y reducción en las precipitaciones para la Península de Yucatán, lo que provocaría sequías prolongadas en las costas de la misma, por lo que el riego se presenta como una opción real en el manejo silvícola del árbol ramón.

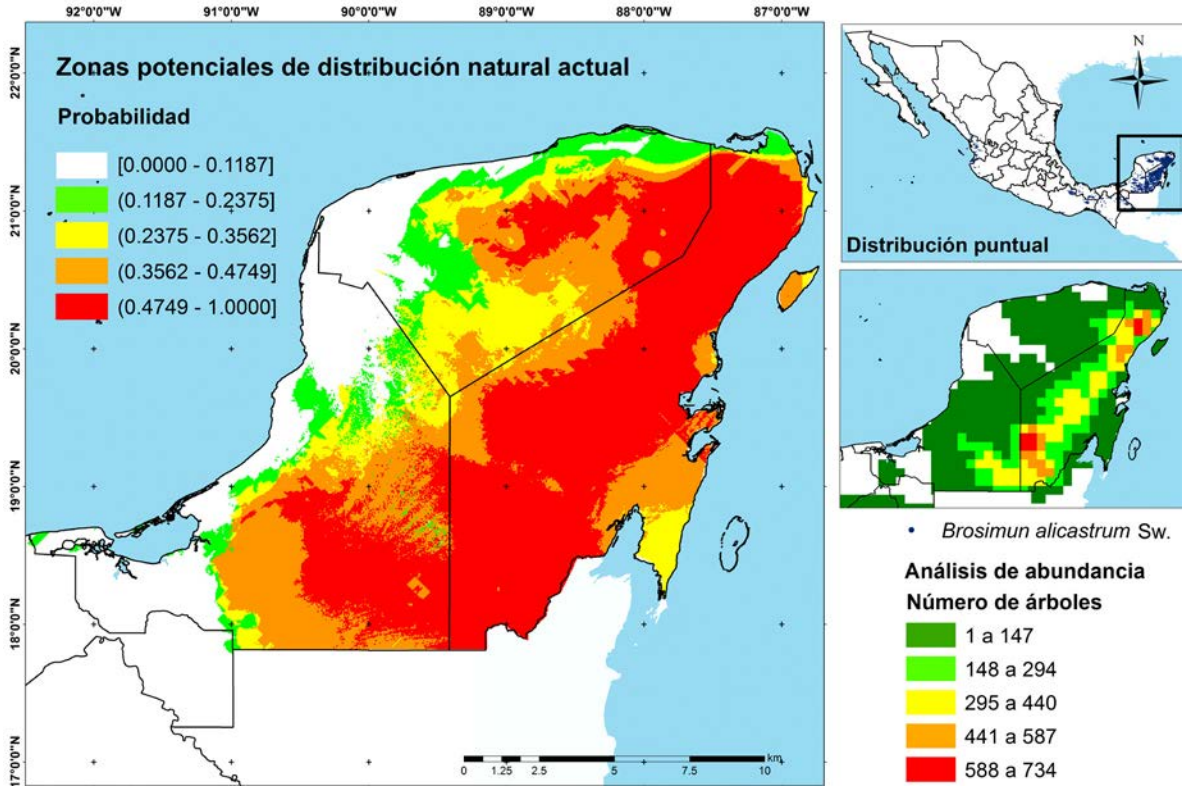


Figura 4. Ubicación espacial de las zonas potenciales para el desarrollo de *Brosimum alicastrum* Sw. en la Península de Yucatán, mediante el algoritmo de Máxima Entropía, considerando aspectos climáticos.

Cuadro 2. Porcentaje de coberturas de las zonas potenciales con mayor probabilidad para el desarrollo de *Brosimum alicastrum* Sw. en la península de Yucatán y su relación con la disponibilidad de agua.

Estado	Anual (mm)		Pre – ETP	Cobertura (%)†
	Precipitación (Pre)	Evapotranspiración potencial (ETP)	mm	
Quintana Roo	1284.20	518.56	765.64	70.51
Campeche	1333.35	1326.47	6.88	19.33
Yucatán	1084.68	1217.97	-133.29	10.16

†Valores estimados considerando las regiones con probabilidades superiores a 0.4749

CONCLUSIONES

La disponibilidad de agua en las áreas de distribución de *Brosimum alicastrum* Sw. en la Península de Yucatán está disminuyendo (β_1 = -0.0212). La evaporación anual (el 85% de la precipitación en la región se evapora) y la precipitación en el trimestre más húmedo (150 mm por mes, julio a septiembre) son los factores que condicionan su distribución potencial actual. Los modelos de cambio climático pronostican una reducción en la cobertura de la especie del 80 % del área actual, alejándola de las costas y concentrándola en el centro de la Península de Yucatán, por lo que en el manejo silvícola de la especie, el riego se presenta como opción para garantizar su cobertura y los productos que de *Brosimum alicastrum* Sw. se obtienen.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del Proyecto Número 364, Reconversión productiva sustentable para el desarrollo de los productores rurales de Campeche, asignado al primer autor por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnologia (CONACyT). A los revisores anónimos del escrito por sus comentarios, que ayudaron a enriquecer la investigación.

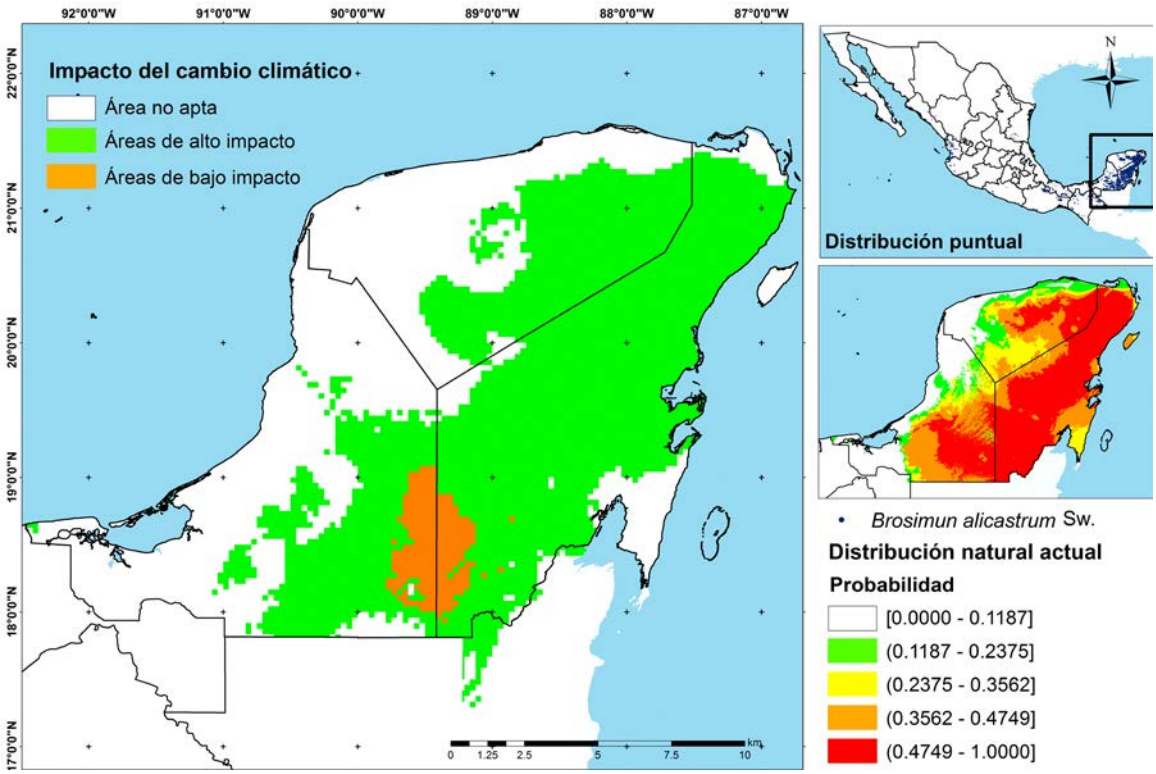


Figura 5. Representación espacial del habitad climático futuro para *Brosimum alicastrum* Sw. en la Península de Yucatán, a partir de modelos de cambio climático MaxEnt para 2050.

BIBLIOGRAFÍA

Baldwin R. A. (2009) Use of maximum entropy modeling in wildlife research. *Entropy* 11:854-866, https://doi.org/10.3390/e11040854

Calder I. R. (2007) Forests and water–ensuring forest benefits outweigh water costs. *Forest Ecology and Management* 251:110-120, https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.06.015

CLICOM, Climate Computing Project (2018) Base de datos climatológica nacional. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Ensenada, Baja California, México. http://clicom-mex.cicese.mx/mapa.html (Agosto 2018).

CONAFOR, Comisión Nacional Forestal (2012) Inventario Nacional Forestal y de Suelos: Manual y Procedimientos para el Muestreo de Campo. Re-muestreo 2011. Comisión Nacional Forestal, Zapopan, Jalisco, México. 140 p.

CONAFOR, Comisión Nacional Forestal (2014) Inventario nacional forestal y de suelos. Comisión Nacional Forestal. Zapopan, Jalisco, México. http://transparencia01.cnf.gob.mx/OpenData/Inventario/INFYS_Microcuenca_2009_2014/ (Julio 2018).

Elith J., S. J. Phillips, T. Hastie, M. Dudík, Y. E. Chee and C. J. Yates (2011) A statistical explanation of MaxEnt for ecologists. *Diversity and Distributions* 17:43-57, https://doi.org/10.1111/j.1472-4642.2010.00725.x

Fick S. E. and R. J. Hijmans (2017) WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37:4302-4315, https://doi.org/10.1002/joc.5086

Fielding A. H. and J. F. Bell (1997) A review of methods for the assessment of prediction errors in conservation presence/absence models. *Environmental Conservation* 24:38-49, https://doi.org/10.1017/S0376892997000088

Garza-López M., J. M. Ortega-Rodríguez, F. J. Zamudio-Sánchez, J. F. López-Toledo, F. A. Domínguez-Álvarez y C. Sáenz-Romero (2016) Calakmul como refugio de *Swietenia macrophylla* King ante el cambio climático. *Botanical Sciences* 94:43-50, https://doi.org/10.17129/botsci.500

Garza-López M., J. M. Ortega-Rodríguez, F. J. Zamudio-Sánchez, J. F. López-Toledo, F. A. Domínguez-Álvarez y C. Sáenz-Romero (2018) Modificación del hábitat para *Lysiloma latisiliquum* (L.) Benth (Tzalam) por el cambio climático. *Revista Fitotecnia Mexicana* 41:127-135, https://doi.org/10.35196/rfm.2018.2.127-135

Gujarati D. N. (2007) Econometría. McGraw-Hill Company, Inc. Ciudad de México, México. 972 p.

Hernández-González O., S. Vergara-Yoisura y A. Larqué-Saavedra (2015) Primeras etapas de crecimiento de *Brosimum alicastrum* Sw. en Yucatán. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 6:38-48, https://doi.org/10.29298/rmcf.v6i27.279

Hijmans R. J., S. E. Cameron, J. L. Parra, P. G. Jones and A. Jarvis (2005) Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25:1965-1978, https://doi.org/10.1002/joc.1276

Hijmans R. J., L. Guarino and P. Mathur (2012) Diva-Gis version 7.5. A geographic information system for the analysis of species distribution data. http://www.diva-gis.org/download (August 2018).

INEGI, Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2016) Uso del suelo y vegetación, escala 1:250000, serie VI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, Aguascalientes, México. http://www.conabio.gob.mx/informacion/metadata/gis/usv250s6gw.xml?_httpcache=yes&_xsl=/db/metadata/xsl/fgdc_html.xsl&_indent=no (Junio 2018).

IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change (2007) Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. The Core Writing Team, R. K. Pachauri and A. Reisinger (eds.). Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland. 104 p.

Leibing C., M. van Zonneveld, A. Jarvis and W. Dvorak (2009) Adaptation of tropical and subtropical pine plantation forestry to climate change: realignment of *Pinus patula* and *Pinus*

tecunumanii genotypes to 2020 planting site climates. *Scandinavian Journal of Forest Research* 24:483-493, https://doi.org/10.1080/02827580903378642

Malamos N., P. E. Barouchas, I. L. Tsirogiannis, A. Liopa-Tsakalidi and T. Koromilas (2015) Estimation of monthly FAO Penman-Monteith evapotranspiration in GIS environment, through a geometry independent algorithm. *Agriculture and Agricultural Science Procedia* 4:290-299, https://doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.03.033

Meiners M., C. Sánchez G. y S. de Blois (2009) El ramón: fruto de nuestra cultura y raíz para la conservación. *Biodiversitas* 87:7-10.

Miranda S. C. A., G. Geada L. y R. Sotolongo S. (2017) Modelación de hábitats potenciales de *Pinus caribaea* Morelet var. *caribaea* Barret y Golfari en el occidente de Cuba. *Avances* 19:42-50.

Ovando-Hidalgo N., J. Tun-Garrido, G. Mendoza-González y V. Parra-Tabla (2020) Efecto del cambio climático en la distribución de especies clave en la vegetación de duna costera en la península de Yucatán, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 91:e912883, https://doi.org/10.22201/ib.20078706e.2020.91.2883

Phillips S. J., R. P. Anderson and R. E. Schapire (2006) Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecological Modelling* 190:231-259, https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.03.026

Philips S. J., M. Dudík and R. E. Schapire (2018) MaxEnt software for modeling species niches and distributions (version 3.4.1). American Museum of Natural History. New York, NY, USA. http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/ (August 2018).

Ramírez-Sánchez S., D. Ibáñez-Vázquez, M. Gutiérrez-Peña, M. S. Ortega-Fuentes, L. L. García-Ponce y A. Larqué-Saavedra (2017) El ramón (*Brosimum alicastrum* Swartz) una alternativa para la seguridad alimentaria en México. *Agroproductividad* 10:80-83.

Rolim G. S., P. C. Sentelhas e V. Barbieri (1998) Planilhas no ambiente EXCEL™ para os cálculos de balanços hídricos: normal, sequencial, de cultura e de produtividade real e potencial. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 6:133-137.

Ruíz-Álvarez O., R. Arteaga-Ramírez, M. A. Vázquez-Peña, R. E. Ontiveros C. y R. López-López (2012) Balance hídrico y clasificación climática del estado de Tabasco, México. *Universidad y Ciencia* 28:1-14.

Santillán G. E., G. Davila-Vazquez, J. De Anda S. y J. J. Díaz T. (2013) Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazones, Veracruz, México. *Ambiente & Água* 8:104-117, https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1147

Sentelhas P. C., D. L. dos Santos e R. E. Machado (2008) Water deficit and water surplus maps for Brazil, based on FAO Penman-Monteith potential evapotranspiration. *Ambiente & Água* 3:28-42, https://doi.org/10.4136/ambi-agua.59

Siabato W. y J. Guzmán-Manrique (2019) La autocorrelación espacial y el desarrollo de la geografía cuantitativa. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 28:1-22, https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.76919

Thornthwaite C. W. and J. R. Mather (1957) Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publications in Climatology* 10:185-311.

Van Zonneveld M., A. Jarvis, W. Dvorak, G. Lema and C. Leibing (2009) Climate change impact predictions on *Pinus patula* and *Pinus tecunumanii* populations in Mexico and Central America. *Forest Ecology and Management* 257:1566-1576, https://doi.org/10.1016/j.foreco.2008.12.027

Van Ittersum M. K. and R. Rabbinge (1997) Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research* 52:197-208, https://doi.org/10.1016/S0378-4290(97)00037-3

Van Ittersum M. K., P. A. Leffelaar, H. van Keulen, M. J. Kropff, L. Bastiaans and J. Goudriaan (2003) On approaches and applications of the Wageningen crop models. *European Journal of Agronomy* 18:201-234, https://doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00106-5

Vega L. A., J. I. Valdez H. y V. M. Cetina A. (2003) Zonas ecológicas de *Brosimum alicastrum* Sw. en la costa del Pacífico mexicano. *Madera y Bosques* 9:27-53, https://doi.org/10.21829/myb.2003.911287

Vergara-Yoisura S., C. I. Briceño-Santiago, J. V. Pérez-Balam, O. Hernández-González, L. G. Rosado-Loria y A. Larqué-Saavedra (2014) Publicaciones de *Brosimum alicastrum*. Centro de Investigación Científica de Yucatán Mérida, Yucatán, México. 102 p.